

Herausforderungen und Potenziale dezentraler Sektorenkopplungslösungen: am Beispiel der energetischen Biomassenutzung in Nordhessen

Bauriedl, Sybille; Waegerle, Lisa; Wiechers, Henk; Kronenthaler, David;
Herbold, Birgit

Veröffentlichungsversion / Published Version
Arbeitspapier / working paper

Empfohlene Zitierung / Suggested Citation:

Bauriedl, S., Waegerle, L., Wiechers, H., Kronenthaler, D., & Herbold, B. (2021). *Herausforderungen und Potenziale dezentraler Sektorenkopplungslösungen: am Beispiel der energetischen Biomassenutzung in Nordhessen*. (artec-paper, 227). Bremen: Universität Bremen, Forschungszentrum Nachhaltigkeit (artec). <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0168-ssoar-73224-3>

Nutzungsbedingungen:

Dieser Text wird unter einer Deposit-Lizenz (Keine Weiterverbreitung - keine Bearbeitung) zur Verfügung gestellt. Gewährt wird ein nicht exklusives, nicht übertragbares, persönliches und beschränktes Recht auf Nutzung dieses Dokuments. Dieses Dokument ist ausschließlich für den persönlichen, nicht-kommerziellen Gebrauch bestimmt. Auf sämtlichen Kopien dieses Dokuments müssen alle Urheberrechtshinweise und sonstigen Hinweise auf gesetzlichen Schutz beibehalten werden. Sie dürfen dieses Dokument nicht in irgendeiner Weise abändern, noch dürfen Sie dieses Dokument für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, aufführen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Mit der Verwendung dieses Dokuments erkennen Sie die Nutzungsbedingungen an.

Terms of use:

This document is made available under Deposit Licence (No Redistribution - no modifications). We grant a non-exclusive, non-transferable, individual and limited right to using this document. This document is solely intended for your personal, non-commercial use. All of the copies of this documents must retain all copyright information and other information regarding legal protection. You are not allowed to alter this document in any way, to copy it for public or commercial purposes, to exhibit the document in public, to perform, distribute or otherwise use the document in public.

By using this particular document, you accept the above-stated conditions of use.

Herausforderungen und Potenziale dezentraler Sektorenkopplungs- lösungen

Am Beispiel der energetischen
Biomassennutzung in Nordhessen.

Sybille Bauriedl, Lisa Waegerle, Henk Wiechers,
David Kronenthaler mit einem Beitrag von Birgit Herbold

Das artec Forschungszentrum Nachhaltigkeit ist ein interdisziplinäres Zentrum der Universität Bremen zur wissenschaftlichen Erforschung von Fragen der Nachhaltigkeit. Das Forschungszentrum Nachhaltigkeit gibt in seiner Schriftenreihe „artec-paper“ in loser Folge Aufsätze und Vorträge von Mitarbeiter*innen sowie ausgewählte Arbeitspapiere und Berichte von Forschungsprojekten heraus.

Impressum

Herausgeber*in:

Universität Bremen
artec Forschungszentrum Nachhaltigkeit
Postfach 33 04 40
28334 Bremen
Tel.: 0421 218 61801
Fax: 0421 218 98 61801
URL: www.uni-bremen.de/artec

Kontakt:

Katja Hessenkämper
E-Mail: hessenkaemper@uni-bremen.de

Das vorliegende Working Paper ist im Arbeitspaket 4 „Transformation“ des Verbundprojekts *„Klimaresiliente Stadt-Umland Kooperation. Regionale Innovationen energetischer Biomassenutzung und Governance (KlimaInnoGovernance)“* entstanden.

Das Forschungsprojekt konzentriert sich auf Transformationsoptionen von Stadt-Umland-Kooperationen im Hinblick auf alternative Biomasseinnovationen. Empirisch erarbeitet werden intersektorale Entwicklungspotenziale, multiskalare Transformationsaspekte sowie Bedingungen eines transkommunalen Transfers. Betrachtet werden strukturelle, institutionelle und polit-ökonomische Rahmenbedingungen von Transformationsprozessen.

Förderung: Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Förderungsschwerpunkt Zukunftsstadt

Laufzeit: 01.04.2018 – 31.01.2022

Leitung des Arbeitspakets Transformation: Prof. Dr. Sybille Bauriedl

Kooperationspartner*innen: Universität Bremen, Institut für Technik- und Zukunftsforschung, Stadt Felsberg, Stadt Hofgeismar, Stadt Wolfhagen, Energie 2000 e.V. im Landkreis Kassel

Herausforderungen und Potenziale dezentraler Sektorenkopplungslösungen. Am Beispiel der energetischen Biomassenutzung in Nordhessen.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Abkürzungsverzeichnis	III
1. Einleitung	1
2. Konzeptionelle Rahmung der Sektorenkopplung	3
2.1 Sektorenkopplung im öffentlichen und wissenschaftlichen Diskurs	4
2.2 Sektorenverständnis im Projekt KlimainnoGovernance	5
2.3 Mehrdimensionaler Zugang zur Sektorenkopplung	8
3. Analyseergebnisse dezentraler Sektorenkopplungslösungen	11
3.1 Politisch-regulatorische Herausforderungen und Potenziale	14
3.2 Sozial-ökologische Herausforderungen und Potenziale	17
3.3 Ökonomisch-technische Herausforderungen und Potenziale	21
4. Zusammenfassung der Herausforderungen und Potenziale der Sektorenkopplung	22
5. Literaturverzeichnis	27

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Dezentrale Kopplungsformen (Eigene Darstellung)	6
Abbildung 2: Elemente der Sektorenkopplung einer energetischen Biomassenutzung in Nordhessen (Eigene Darstellung nach Wietschel et al. 2019: 6)	8
Abbildung 3: Dimensionen der Sektorenkopplungslösungen (Eigene Darstellung)	10
Abbildung 4: Praxisbeispiel aus Hofgeismar: Sektorenkopplung mit Biomassereststoffen (von Birgit Herbold)	12
Abbildung 5: Herausforderungen und Potenziale der Sektorenkopplung (Eigene Darstellung)	14
Abbildung 6: Ergebnisse dezentraler Kopplungsformen (Eigene Darstellung)	24

Abkürzungsverzeichnis

AwsV	Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen
BHKW	Blockheizkraftwerk
EE	Erneuerbare Energien
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
GHD	Gewerbe, Handel und Dienstleistungen
NawaRo	Nachwachsende Rohstoffe

1. Einleitung

Mit diesem Working Paper betrachten wir zwei neue Hoffnungsträger der dezentralen Energiewende: Biomassereststoffnutzung und Sektorenkopplung. Wir stellen eine systematisierte Zusammenfassung der aktuellen Debatte dieses vielstimmigen Feldes der Energie- und Klimaschutzpolitik vor und untersuchen die Potenziale der Sektorenkopplung für eine effektive und nachhaltige Nutzung von Biomassereststoffen. Die energetische Nutzung von Biomasse ist im Rahmen einer nachhaltigen Energiewende von zentraler Bedeutung, um die Klimaziele einer Dekarbonisierung von Produktion, Mobilität und Konsum zu erreichen (Gawel et al. 2019). Im Vergleich zum Anbau von Energiepflanzen gilt die energetische Nutzung von Biomassereststoffen als nachhaltigerer Ansatz (Steubing et al. 2020), insbesondere in Kombination mit einer dezentralen, regionalen oder lokalen Nutzung dieser Ressourcen sowohl für die Energienutzung als auch für die Wärmeerzeugung (Hauser & Wern 2016). Die Herausforderungen liegen in der Nutzbarmachung stark dezentral, saisonal und fragmentiert anfallender Biomassereststoffe. Außerdem unterscheiden sich die kommunal gewachsenen Entsorgungs- und Versorgungsstrukturen stark.

Die hier vorliegenden Erkenntnisse schließen an Vorgängerprojekte zu Klimaanpassungsgovernance (vgl. Bauriedl 2016) und Energiegovernance (vgl. Baasch 2016) in Nordhessen an. Ziel des laufenden Verbundprojektes ist die Entwicklung und Erprobung von Handlungsansätzen für eine effiziente und nachhaltige Verwertung von bisher ungenutzten Biomassepotenzialen auf regionaler und lokaler Ebene. Die Herausforderungen und Potenziale der Sektorenkopplung werden vom Teilprojekt der Europa-Universität Flensburg bearbeitet. Während der Arbeit des inter- und transdisziplinären Verbundes hat sich gezeigt, dass mit dem Konzept „Sektorenkopplung“ sehr unterschiedliche Vorstellungen verbunden sind und dass die verschiedenen fachlichen und allgemeinen Verwendungen des Begriffs „Sektor“ zu zusätzlicher Verwirrung führen. Mit dem Working Paper wollen wir daher sowohl eine Systematisierung des Konzeptes einer Sektorenkopplung vorlegen als auch einen Definitionsvorschlag anbieten.

Um ihre 2010 beschlossenen energiepolitischen Ziele zu erreichen, die eine Senkung der Treibhausgasemissionen von 80 bis 95 Prozent in Deutschland bis 2050 vorsehen, setzt die deutsche Bundesregierung neben die Klimaschutzstrategien Energieeffizienz und Nutzung

erneuerbarer Energien als weiteren Schwerpunkt auf das Konzept der Sektorenkopplung¹ (vgl. „Klimaschutzplan 2050“ BMU 2016, „Grünbuch Energieeffizienz“ BMWi 2016a, „Stromtrends 2030“ BMWi 2017). Auf diesen „Dreiklang der Energiewende“ bezieht sich auch das Land Hessen, das anstrebt bis 2050 klimaneutral zu werden und hierfür im *Integrierten Klimaschutzplan Hessen 2025*² 140 Maßnahmen für Klimaschutz und Klimawandelanpassung darstellt (HMWEV 2020: 119). Zahlreiche Publikationen zum Thema Sektorenkopplung verweisen explizit auf den Dreiklang der Energiewende (u.a. Ausfelder et al. 2017; Kharboutli et al. 2018; acatech et al. 2017).

Wir sehen in der vorliegenden Literatur zur Sektorenkopplung zwei Lücken. Zum einen mangelt es an einer einheitlichen Definition, die auch Rest- und Abfallstoffe miteinbezieht. Es ist nicht eindeutig und konsensual formuliert, *was* unter Sektoren verstanden wird und *welche* Sektoren miteinander gekoppelt werden sollen. Zum anderen mangelt es an empirischen Ergebnissen bezüglich Herausforderungen und Anpassungspotenzialen dezentraler Sektorenkopplungslösungen mit Rest- und Abfallstoffen, obwohl der energetischen Nutzung von Rest- und Abfallstoffen ein großes Potenzial beigemessen wird. So benennt das Deutsche Biomasseforschungszentrum auf der Jahrestagung 2020 die Priorisierung der Biomassereststoffnutzung im Kontext der Klimaschutzpotenziale von Sektorenkopplungen (DBFZ 2020). Insbesondere Rest- und Abfallstoffen aus der Land- und Forstwirtschaft oder der Nahrungsmittelindustrie wird gemeinhin im Rahmen der stofflichen und energetischen Nutzung (Kaskadennutzung) ein großes Potenzial beigemessen (ebd.: 120). Der Blick in die wissenschaftliche Literatur zeigt bisher wenige empirische Ergebnisse, die Biomassereststoffpotenziale und dezentrale Sektorenkopplungslösungen verbinden.

Das vorliegende Working Paper, das im Rahmen des BMBF-Projekts „Klimaresiliente Stadt-Umland Kooperation. Regionale Innovationen energetischer Biomassenutzung und Governance (KlimaInnoGovernance)“ entstanden ist, leistet einen Beitrag zu konzeptionellen und empirischen Fragen der Ausgestaltungsformen der Sektorenkopplung. Zentral ist

¹ In der Literatur werden die Begriffe „Sektorkopplung“ und „Sektorenkopplung“ synonym verwendet (Wietzel et al. 2019: 2). Wir verwenden in diesem Paper den letzteren Begriff.

² Der *Integrierte Klimaschutzplan Hessen 2025* ist online abrufbar unter: <https://www.klimaschutzplan-hessen.de/startseite>

die Betrachtung der dezentralen Energiewende als ein relationales Phänomen und der damit verbundenen Annahme, dass Innovationen reguliert werden von multidimensionalen und kontextspezifischen Rahmenbedingungen. Hierfür wird in Kapitel 2 auf Grundlage der aktuellen wissenschaftlichen und politischen Debatte sowie kommunaler Expert*innengespräche³ eine eigene und umfassende Definition der Sektorenkopplung für Abfall- und Reststoffe erarbeitet. Annahme dabei ist, dass Sektorenkopplung im Rahmen einer dezentralen Energiewende erst durch ein Zusammenspiel politisch-regulativer, sozial-ökologischer und technisch-ökonomischer Anpassungspotenziale auf kommunaler Ebene möglich wird. Im darauffolgenden Kapitel 3 werden Herausforderungen und Anpassungspotenziale dezentraler Sektorenkopplungslösungen herausgearbeitet. Auf Grundlage von zwölf Interviews mit Expert*innen und einem Praxisbeispiel aus Hofgeismar wird dargestellt, wie sich Sektorenkopplungslösungen am Beispiel von Nordhessen manifestieren. Abschließend werden die vorher identifizierten Potenziale und Herausforderungen diskutiert (Kap. 4).

2. Konzeptionelle Rahmung der Sektorenkopplung

Der Sektorenkopplung, das zeigt der Blick in klimapolitische Dokumente, wie den Klimaschutzplan 2050 oder das Grünbuch Energieeffizienz, wird ein zentraler Stellenwert in der Energiewende und zur Erreichung der Klimaschutzziele beigemessen. Im Rahmen der nationalen Klimapolitik und der Umweltforschung wird mit unterschiedlichen Definitionen von Sektorenkopplung argumentiert, die an dieser Stelle nachgezeichnet und deren jeweiligen Potenziale und Konsequenzen diskutiert werden sollen – inspiriert durch kommunale Expert*innengespräche. Daran anschließend argumentieren wir für die Notwendigkeit einer mehrdimensionalen und sektorenübergreifenden Betrachtungsweise, die bereits bei der Aufbereitung und Verwertung von Abfall- und Reststoffen beginnt.

³ In Kap. 2.2 auf Seite 10 werden die Expert*innen mit ihren jeweiligen Tätigkeitsbereichen dargestellt.

2.1 Sektorenkopplung im öffentlichen und wissenschaftlichen Diskurs

Trotz der großen politischen Bedeutung existiert bislang keine einheitliche Definition von Sektorenkopplung (Kharboutli et al. 2018: 5; Wietschel et al. 2019: 2). Unterschiede bestehen etwa hinsichtlich der Definition von Sektoren oder der Reichweite möglicher Kopplungsformen. Gemeinsam ist allen Vorstellungen von Sektorenkopplung jedoch die Zielsetzung: Oberstes Anliegen ist demnach die Substituierung fossiler durch Erneuerbare Energieträger und die Senkung der Treibhausgase (acatech et al. 2017; BMU 2016; BMWi 2016a, b; Schwan et al. 2016; Wietschel et al. 2019: 5). Als weitere wichtige Ziele werden die erhöhte Effizienz und die Bereitstellung von Flexibilitätsoptionen, die von einem auf EE umgestellten Energiesystem benötigt werden, genannt (acatech et al. 2017; BMWi 2016a, b; Schwan et al. 2016).

Politisch dominant ist das Verständnis von Sektorenkopplung im Sinne einer direkten bzw. indirekten Elektrifizierung der Sektoren Wärme und Verkehr (Ausfelder et al. 2017; BMWi 2016a, b; Kharboutli et al. 2018). Im Grünbuch Energieeffizienz des BMWi (2016a: 25) heißt es etwa: „Bei der Sektorkopplung bedient das Stromangebot die Nachfrage nach Energie in Haushalten (Wärme und Kälte) und Verkehr (Antrieb) sowie in Industrie und GHD (Wärme, Kälte und Antrieb).“ In diesem Verständnis steht klar der Stromsektor im Fokus. Solar- und Windkraft werden dabei als zentrale Energieträger begriffen. Da diese aber elektrische Energie erzeugen und die Sektoren Wärme bzw. Verkehr bislang wenig elektrifiziert sind, müssen jene an den Stromsektor gekoppelt werden. Direkte Elektrifizierung bezieht sich auf solche Technologien, die elektrischen Strom direkt nutzen, etwa Elektroautos im Verkehr oder Wärmepumpen im Gebäudesektor. Unter indirekter Elektrifizierung wird die Herstellung von Wasserstoff bzw. synthetischen Gasen und Kraftstoffen verstanden, die dann wiederum verbrannt werden (Power-to-X-Technologien) (Schwan et al. 2016: 24ff.). Der Bioenergie wird aufgrund der ihr inhärenten Potenzialgrenzen eine geringere Bedeutung zugeschrieben (acatech et al. 2017: 8). Auch bei einer stärkeren Elektrifizierung des Wärme- und Verkehrssektors wird Bioenergie dort nützlich sein, wo keine alternativen Technologien vorhanden sind (Schwan et al. 2016: 29)

In einem umfassenderen Sinne zielt Sektorenkopplung auf eine stärkere Integration bislang relativ unabhängiger Systemkomponenten, wie etwa Energieerzeugung und -verbrauch, aber auch unterschiedlichen Infrastruktursystemen der Daseinsvorsorge, wie etwa

Wasser- und Energieversorgung, ab (Amanpour et al. 2018; Hirschnitz-Garbers et al. 2020). Etwas spezifischer definieren Wietschel et al. (2019: 3; Eigene Hervorh.) Sektorenkopplung als

„sowohl neuartige Verzahnungen der klassischen **Verbrauchssektoren** der Energiewirtschaft (Haushalte, Gewerbe, Handel, Dienstleistung, Industrie und Verkehr), als auch die der **Energie-träger** und **Endenergieformen** (Strom, Wärme/Kälte sowie Kraft- und Brennstoffe) und der mit ihnen gekoppelten **Infrastrukturen** (Stromnetze, Gasnetze, Wärmenetze, Informations- und Kommunikationsnetze)“.

Demnach umfasst Sektorenkopplung Verschränkungen verschiedener Teilbereiche und Technologien, etwa von Infrastrukturen wie denen von Verkehr, Abfall und Siedlungsentwicklung, die Verbindung von Teilsektoren wie Strom und Wärme oder die Kopplung innerhalb eines Teilsektors, wie der von Anlagen zur Stromerzeugung und -speicherung (Libbe 2017: 4; Olfert et al. 2020: 22).

2.2 Sektorenverständnis im Projekt KlimainnoGovernance

Wie in Kap. 2.1 dargestellt, existiert in den politisch relevanten Texten zur Sektorenkopplung kein einheitliches Verständnis, *was* genau unter Sektoren verstanden wird und *welche* Sektoren im Rahmen einer dezentralen Energiewende gekoppelt werden sollen. In Anlehnung an das breit gefasste Sektorenverständnis von Wietschel et al. 2019 (Kap. 2.1) sowie die Ergebnisse der Inhaltsanalyse auf Grundlage von zwölf Expert*innengespräche⁴ werden vier dezentrale Kopplungsformen generiert. Drei von diesen befinden sich auf der vertikalen Achse: die **Aufbereitung und Verwertung der Energieträger**, die Kopplung verschiedener **Endenergieformen**, sowie die Kopplung des **Energiekonsums**. Auf der horizontalen Ebene befinden sich quer dazu die intersektorale Kopplung der **Technologien und Infrastrukturen**, die Einfluss auf die vertikal gelegenen Kopplungsformen nehmen (siehe Abb. 1).

⁴ Die Expert*innengespräche wurden gemeinsam mit Dr. Stefanie Baasch, artec Universität Bremen (Arbeitspaket 2 des Verbundprojekts KlimainnoGovernance) organisiert und durchgeführt. Der Fragebogen für die semi-strukturierten Interviews beinhaltete unterschiedliche Fragen, die sich inhaltlich auf die Bereiche regulatorische Rahmenbedingungen, potenzielle Konflikte und Hindernisse, Strategien für innovative Kopplungsformen (Akteure, Partizipationsmodelle, Finanzierungsformen) innerhalb der Gemeinden bezogen.

Abbildung 1: Dezentrale Kopplungsformen (Eigene Darstellung)

Technologien und Infrastrukturen Herausforderungen/ Potenziale in Bezug auf Flexibilitätsoptionen, wie Energiespeicherlösungen (Power-to-X-Technologien), Anlageneigenschaften, Nah- und Fernwärmenetze, Lagerraum		
Aufbereitung und Verwertung der Energieträger Herausforderungen/ Potenziale in Bezug auf Nutzungskonkurrenzen, Transportwege, Entsorgungsformen, Lagerung	Endenergieformen Herausforderungen/ Potenziale für die Erzeugung von Endenergieformen: Strom, Wärme/Kälte, Mobilität und industrielle Prozesse	Energiekonsum Herausforderungen/ Potenziale möglicher Verknüpfungen der Verbrauchssektoren: Haushalte, GHD, Verkehr, Industrie bzw. deren Gebäudetyp und Eigentümer*innen

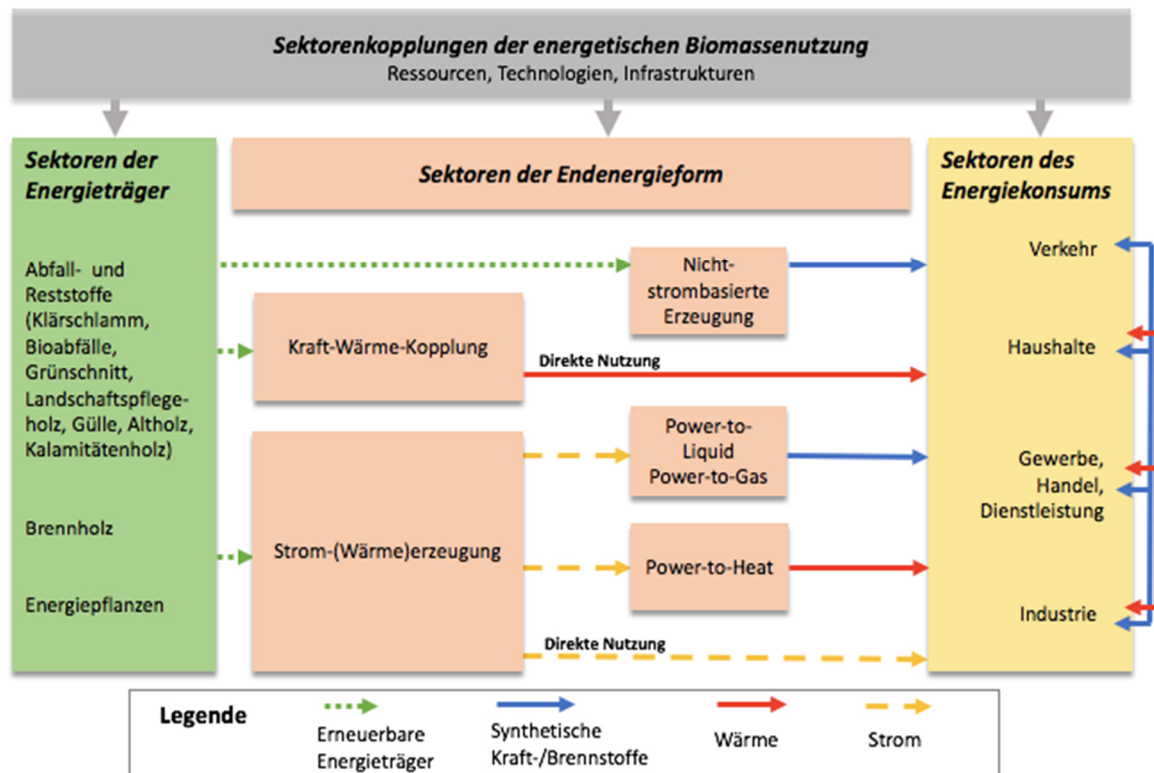
Die Expert*innen kommen aus folgenden Tätigkeitsbereichen: wissenschaftliche Einrichtung mit angewandter Forschung in Nordhessen (A), Maschinenring KommunalService GmbH (B), Klimaschutzmanager (C), regionale Abfallentsorgung (D), regionale Energieversorgung (E und K), Revierförsterei (F), Energieberatung (G), Gemeindeamt für Umwelt und Tiefbau (H), Kreisausschüsse: Landwirtschaft (I) Bauaufsicht und Abfall (J), Regierungspräsidium: Landwirtschaft (L).

Sektorenkopplung beginnt bereits bei der Aufbereitung und Verwertung von Abfall- und Reststoffen. Neben bestehenden Nutzungskonkurrenzen in Bezug auf Biomassereststoffpotenziale, die in den Kommunen bereits anderweitig verwertet werden (können), spielen auch Transportwege sowie Entsorgungsformen und Lagerungsmöglichkeiten eine Rolle. Im Sinne einer kommunalen Lösung werden auch gewerbliche Speisereste oder gewerbliche Bioabfälle betrachtet, die bisher bspw. in größeren Anlagen verwertet werden (A: 14). Möglich ist auch eine Kombination unterschiedlicher Energieträger: Grüngut kann bspw. – je nach Qualität des Landschaftspflegematerials – für die energetische Verwertung aufgewertet werden (A: 9). Eine weitere Kopplungsform stellen die Endenergieformen Strom, Wärme/Kälte, Mobilität und industrielle Prozesse dar. Durch eine direkte Elektrifizierung (Elektromobilität oder Power-to-Heat) sowie eine indirekte Elektrifizierung (Power-to-Gas,

Power-to-Liquid) können nachhaltigere Nutzungsformen entstehen. Im Rahmen der klassischen Unterscheidung für den Energiekonsum zwischen Haushalten, GHD, Verkehr und Industrie ist es zielführend sowohl zwischen den Eigentümer*innen (bspw. kommunale Liegenschaften) als auch dem Gebäudetyp (Fachwerk- und Bauernhäuser, Neubaugebiete) zu differenzieren. Nahwärme wird bspw. dann als rentabel bezeichnet, wenn historische Gebäude oder Fachwerkhäuser mit angeschlossen sind, die auch perspektivisch einen etwas höheren Energiebedarf haben als Neubauten (E: 7). Dennoch wird die Energiedichte bspw. in Wolfhagen trotz der Fachwerkhäuser im Vergleich zur Stadt Kassel als geringer eingestuft, weshalb in Flächenkreisen mit größeren Entfernungen auch Nahwärmeinselnetze eine Möglichkeit darstellen können (K: 4). Auf der horizontalen Ebene befindet sich die Kopplung von Technologien und Infrastrukturen wie Strom-, Wärmenetze, Energiespeicherlösungen und Anlagen, die neben der Reduktion der Treibhausgasemissionen auch die Flexibilität und Effizienz der genannten Sektoren verbessern sollen. Da Strom aus Erneuerbaren teilweise starken Schwankungen unterliegt, muss das Gesamtsystem, um der politischen Vorgabe der Versorgungssicherheit gerecht zu werden, zusätzliche Flexibilitätsoptionen etwa in Form von Speichern bereitstellen. Die kommenden Flexibilitätsanforderungen an das Gesamtsystem sind auch der Grund, dass einer intelligenten und informationsbasierten Steuerung eine große Bedeutung beigemessen wird. Die Digitalisierung soll eine effiziente Flexibilisierung von Angebots- und Nachfrageseite ermöglichen (acatech et al. 2017: 14).

Dezentrale Sektorenkopplung mit Abfall- und Reststoffen wird im Projekt Klimainno-Governance demnach als stoffliche, materielle, informative sowie energetische Kopplung verstanden, die dynamisch ist und sich spezifisch an den räumlichen Kontext anzupassen hat. Abbildung 2 fasst die Elemente der Sektorenkopplung für die Ressourcen, Technologien und Infrastrukturen der energetischen Biomassenutzung entlang der Sektoren der Energieträger, der Endenergieproduktion und des Energiekonsums zusammen. Für eine effektive Biomassenutzung und nachhaltige Energieumwandlung sind Kopplungsformen innerhalb dieser Sektoren sowie zwischen diesen Sektoren relevant. Es sind also intrasektorale Kopplungen und intersektorale Kopplungsoptionen zu unterscheiden.

Abbildung 2: Elemente der Sektorenkopplung einer energetischen Biomassenutzung in Nordhessen (Eigene Darstellung nach Wietschel et al. 2019: 6)



2.3 Mehrdimensionaler Zugang zur Sektorenkopplung

Sektorenkopplungslösungen hängen entscheidend von regulativen Rahmenbedingungen, räumlichen Gegebenheiten, wie Siedlungs- und Bebauungsstruktur oder Gebäudetypen (Fachwerk, Bauernhäuser, Neubaugebiete, etc.), gesellschaftlichen Naturverhältnissen⁵ und technisch-ökonomischen Rahmenbedingungen ab (Hölscher et al. 2020: 39). Sektorenkopplungslösungen mit dem Ziel einer dezentralen Energiewende benötigen demnach regulative und sozial-ökologische Rahmenbedingungen sowie ökonomische Anreize, die sektorenübergreifend betrachtet werden müssen. Besonders Technologien und Infrastrukturen, die alle Sektoren tangieren, wurden bisher meistens sektorenspezifisch definiert. Regularien und Anreize müssen an neue, mögliche Kopplungsformen angepasst werden

⁵ Der Begriff „Gesellschaftliche Naturverhältnisse“ bezieht sich auf Christoph Görg, der darunter die „vielfältigen Formen, in denen Gesellschaften ihre Beziehungen zur natürlichen Umwelt regulieren“ (Görg 2001: 4) fasst. „Dies schließt nicht nur ökonomische, sondern auch wissenschaftliche, technische, kulturelle und moralische Dimensionen mit ein“ (ebd.).

(Wietschel et al. 2019: 6). Fragen der Sektorenkopplung lassen sich demnach nur im Rahmen einer mehrdimensionalen Betrachtungsweise beantworten. Angenommen wird dabei, dass Innovationen reguliert werden von multidimensionalen und kontextspezifischen Rahmenbedingungen die auch dazu beitragen (können), Rebound-Effekte zu begrenzen bzw. zu verhindern.

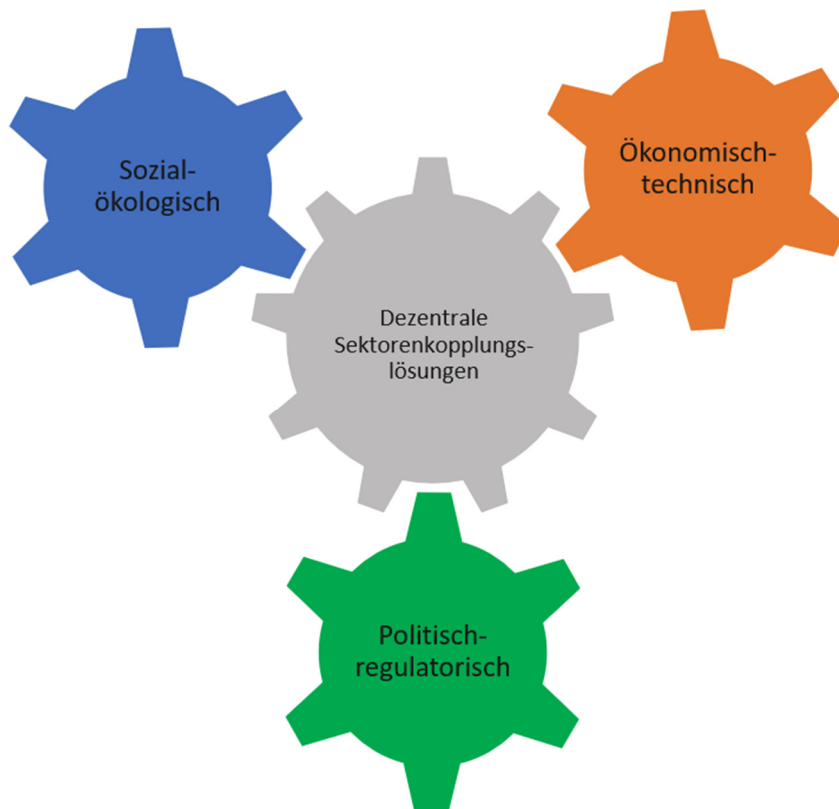
Auf Grundlage der Expert*inneninterviews mit kommunalen Akteuren der Untersuchungsregionen sowie in Anlehnung an die Transformationsliteratur (Schneidewind 2013: 82ff.; Bader et al. 2019: 17) werden drei Dimensionen als relevant für dezentrale Sektorenkopplungslösungen betrachtet: *politisch-regulativ*, *sozial-ökologisch* und *ökonomisch-technisch*⁶. Beispielsweise können politisch-regulative Rahmenbedingungen, sozial-ökologische Nutzungskonkurrenzen oder auch fehlende Investitions- oder Planungssicherheiten kommunale Handlungsspielräume einschränken, d.h. dazu führen, dass Sektorenkopplungslösungen nicht kontextspezifisch umgesetzt werden (können). Sektorenkopplung darf demnach nicht nur als technisches oder regulatives Phänomen verstanden werden. Eine dezentrale Sektorenkopplung muss auch materiell-physische Bedingungen von Beginn an betrachten. Handelt es sich bei der Biomasse bspw. um Mais aus hochintensiver Landwirtschaft oder um importierte Rest- und Abfallstoffe mit verbundenen Naturaneignung(en) in Ländern des Globalen Südens, ist diese nicht als innovativ einzuordnen (Tittor 2020).

Die **sozial-ökologische Dimension** umfasst Aneignungs- und Nutzungsformen der Rest- und Abfallstoffe. Dabei sind Entsorgungs- und Verwertungsoptionen sowie Suffizienzmaßnahmen und Entwicklungsperspektiven zentraler kommunaler Akteure von besonderer Bedeutung. Die **politisch-regulatorische Dimension** betrachtet Regularien wie Steuern, Abgaben sowie Umlagen und Fördermaßnahmen, die eine dezentrale Energiewende hemmen oder unterstützen können. Bestandteile der **ökonomisch-technischen Dimension** sind Energiespeicherlösungen (wie Power-to-X-Technologien), multimodale Mobilität und Digitalisierung im Sinne der Nutzung der Gesamtkapazitäten durch IT-Systeme. Zudem bestim-

⁶ Eine interessante Dimension stellt auch die organisatorisch-kulturelle Dimension dar, die im Rahmen dieser Arbeit nicht aufgenommen werden konnte. Anhand der organisatorisch-kulturellen Dimension können bspw. Kooperationsstrukturen sowie die Motivations- und Innovationsbereitschaft einzelner kommunaler Akteure analysiert werden.

men Planungs- und Investitionssicherheiten diese Dimension, die bspw. aufgrund eines bestehenden Regulierungsrahmens und kurzfristigen technologischen Entwicklungen entstehen oder gehemmt werden können.

Abbildung 3: Dimensionen der Sektorenkopplungslösungen (Eigene Darstellung)



Im folgenden Analysekapitel werden die genannten drei Dimensionen anhand zentraler Herausforderungen und möglicher Anpassungspotenziale dezentraler Sektorenkopplungslösungen entlang der Sektoren (Energieträger, Endenergieformen, Energiekonsum mit Bezug auf Technologien und Infrastrukturen) dargestellt.

3. Analyseergebnisse dezentraler Sektorenkopplungslösungen

Der Annahme des Arbeitspapiers folgend weisen Sektorenkopplungslösungen regional sehr unterschiedliche Charakteristika auf, weshalb Herausforderungen und Anpassungspotenziale in diesem Kapitel zuerst aus der wissenschaftlichen Literatur herausgearbeitet und am Beispiel von Nordhessen kontextualisiert und erweitert werden. Als empirische Grundlage dienen zwölf Expert*innengespräche in den Städten Wolfhagen, Hofgeismar und Kassel⁷, die inhaltsanalytisch ausgewertet werden⁸. Die Ergebnisdarstellung erfolgt im Weiteren unterteilt in die drei Dimensionen politisch-regulatorisch (3.1), sozial-ökologisch (3.2) und ökonomisch-technisch (3.3). In der folgenden Abbildung 4 stellt Birgit Herbold (Bearbeiterin des Teilprojektes KlimaInnoGovernance bei der Stadt Hofgeismar) ein Praxisbeispiel aus Hofgeismar vor, das die vielfältigen Verknüpfungen und dynamischen Prozesse dezentraler Sektorenkopplungslösungen aufzeigt. Hofgeismar ist eine Stadt mit ca. 16.000 Einwohner*innen (Stadt Hofgeismar 2020). Im Bereich der Energiewende weist Hofgeismar Erfahrungen mit Nahwärmenetzen auf, deren Wärme zurzeit vor allem aus Biogasanlagen oder Deponiegas bereitgestellt wird (D: 2; E: 6f.). Relevant ist auch die energetische Verwertung holziger Biomasse (A: 18). Im Umfeld von Hofgeismar befinden sich vielfältige kleinbäuerlich betriebene Biogasanlagen (B: 11 und 13f.). Der Untersuchungsraum zeichnet sich aus durch flächige Landkreise mit geringer Siedlungsdichte und einer hohen Wärmedämmung.

⁷ Die Expert*innengespräche wurden gemeinsam mit Dr. Stefanie Baasch, artec Forschungszentrum Nachhaltigkeit der Universität Bremen (Arbeitspaket 2 des Verbundprojekts KlimaInnoGovernance) organisiert und durchgeführt.

⁸ Für die Analyse wurde das Material in einem ersten Schritt paraphrasiert, d.h. alle inhaltstragenden Textbestandteile wurden auf eine gleichartige Sprachform und in eine grammatikalische Kurzform transformiert. Währenddessen wurden ausschweifende und inhaltslose Textbestandteile ignoriert. Anschließend wurden die Paraphrasen generalisiert und Kategoerein gebildet (Mayring 2010: 69.).

Praxisbeispiel aus Hofgeismar: Sektorenkopplung mit Biomassereststoffen

Das Verbundprojekt KlimainnoGovernance benennt die Entwicklung und Erprobung von Handlungsansätzen als eindeutiges Ziel für eine energieeffiziente und nachhaltige Stadt-Umland-Entwicklung. Schwerpunkt dabei ist die Verwertung von bisher ungenutzten Biomassepotenzialen auf regionaler und lokaler Ebene.

In der Stadt Hofgeismar wird bereits seit den neunziger Jahren ein durch Deponiegas der Kreismülldeponie gespeistes Nahwärmenetz betrieben. An dieses Leitungssystem sind mehrere Schulkomplexe, zwei Kindergärten sowie ein Fitnessstudio angeschlossen. Aufgrund des Ablagerungsverbotes von organikhaltigen Abfällen seit dem 01.06.2005 wird die Biomasse im Inneren der Deponie in absehbarer Zeit vollständig abgebaut sein, sodass eine energetische Nutzung zukünftig nicht mehr möglich sein wird. Damit das bestehende Nahwärmenetz über die in einer „Umweltfabrik“ installierte Mikrogasturbine zuverlässig weiterbetrieben und -versorgt werden kann, werden im Rahmen des Projektes neue Möglichkeiten einer dezentralen Energieproduktion durch die Prüfung von Biomassereststoffpotenzialen zur Nahwärmeversorgung untersucht.

Angestrebt wird die Identifizierung und Etablierung innovativer Kooperationen für den Ausbau von Nahwärmenetzen in Zusammenhang mit einer nachhaltigeren energetischen Biomassenutzung. Hierbei spielt die Entwicklung von Strukturen und Formaten zum Austausch von Handlungswissen zwischen kommunalen Akteuren eine Rolle.

Im Projektverlauf wurden in Hofgeismar verschiedene Möglichkeiten der dezentralen Energieerzeugung eruiert und auf wirtschaftliche und technische Machbarkeit überprüft. Im Rahmen des Anschlusses einer kommunalen Kindertagesstätte an eine örtliche Biogasanlage kamen Gespräche zwischen Projektmitarbeiter*innen und einem Biogasanlagenbetreiber zustande und es fand ein Austausch über die unterschiedlichen Nahwärmenetze mit ihren Entwicklungsmöglichkeiten statt. Hieraus entstand die Idee, als Alternative zur Verwertung des stark zurückgegangenen Deponiegaspotenzials durch den Biogasanlagenbetreiber kurzfristig eine Holzhackschnitzelanlage zu installieren und langfristig den Zusammenschluss der beiden Nahwärmenetze anzustreben.

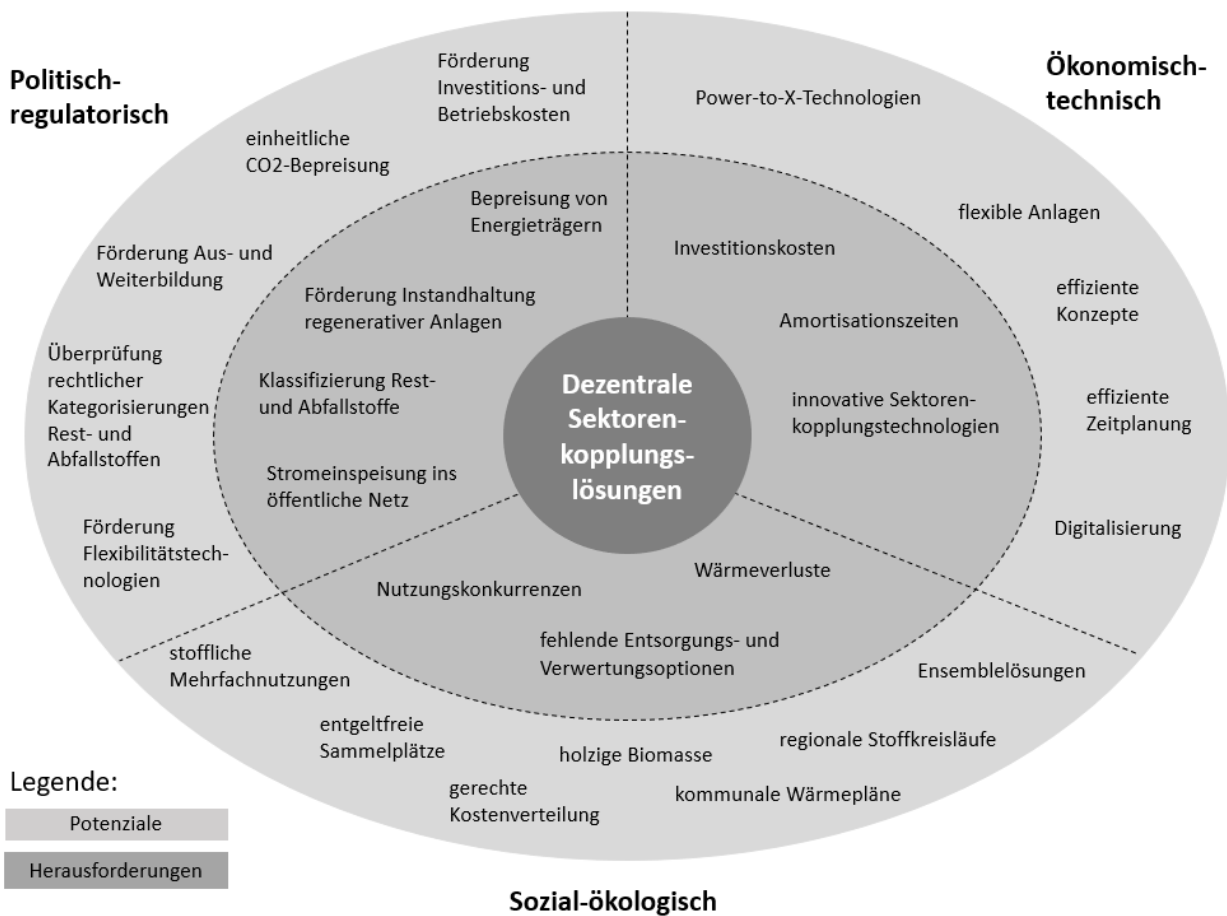
Im Sinne des Schwerpunktthemas Biomassereststoffnutzung wurde darauf aufbauend die grundsätzliche Verwertung von Landschaftspflegematerial sowie Altholz der Kategorien A1 und A2 über die angedachte Anlagentechnik überprüft. Durch die Anpassung einiger technischen Komponenten wie z.B. der Aufbereitung des Materials sowie der Fördertechnik wird im weiteren Projektverlauf mit einem kombinierten Materialmix geplant, der flexibel auf veränderte Potenziale reagieren kann.

Im nächsten Schritt wird die Konstellation der am Nahwärmenetz Beteiligten überprüft. Bisher speiste die Abfallentsorgung des Landkreises Kassel die durch die Produktion und Verwertung des Deponiegases zur Verfügung stehende Wärme über die Mikrogasturbine in das Nahwärmenetz ein. Künftig soll hier so lange wie noch möglich eine kombinierte Erzeugung zwischen Deponiegasverwertung durch die Abfallentsorgung und Betrieb der Holzhackschnitzelanlage durch den Biogasanlagenbetreiber erfolgen. Auf der Abnehmerseite wird es zunächst keine Veränderungen geben. Nach Umstellung der Wärmeerzeugung ist jedoch geplant, weitere Abnehmer*innen hinzuzugewinnen, um die Auslastung des Netzes zu verbessern und die Verluste zu minimieren. Das Nahwärmenetz selber wurde bisher durch einen kommunalen Energieversorger betrieben. Im Rahmen der Projektierung der alternativen Wärmeerzeugung soll überprüft werden, ob das Netz an den Betreiber der Holzhackschnitzelanlage übergeben werden kann, um die technischen Komponenten optimaler aufeinander abstimmen zu können.

Abbildung 5 zeigt Herausforderungen und Anpassungspotenziale dezentraler Sektorenkopplung entlang der drei Dimensionen. Die gestrichelten Linien machen auf die Verwobenheiten zwischen den Dimensionen aufmerksam. Die Potenziale dezentraler Sektorenkopplungslösungen befinden sich im äußeren Kreis, die Herausforderungen im inneren Kreis. Die Zielfunktion *dezentrale Sektorenkopplungslösungen* (Definition siehe Kap. 2.2) ist im inneren Kreis dargestellt.

Die einzelnen Punkte werden in den folgenden Unterkapiteln im Detail erläutert und sind im Textfluss der Übersicht halber kursiv markiert.

Abbildung 5: Herausforderungen und Potenziale der Sektorenkopplung (Eigene Darstellung)



3.1 Politisch-regulatorische Herausforderungen und Potenziale

Die aktuellen politischen und regulatorischen Rahmenbedingungen für Sektorenkopplungslösungen werden in der wissenschaftlichen Literatur als vielfältig, komplex und als teils unstimmig eingeschätzt (Kharboutli et al. 2018: 21; Schwan et al. 2016: 51). Besonders die Sektoren Verkehr, Wärme und Industrie werden als noch nicht ausreichend reguliert eingestuft, obwohl Strom zukünftig besonders in diesen Sektoren genutzt werden soll (Wietschel et al. 2019: 6; BMWi 2016b: 12). Das aktuelle System an Steuern, Abgaben und Umlagen wird als zentrale, regulatorische Hürde bezeichnet, die ein effizientes sowie klima- und umweltverträgliches Energiesystem verhindert (Witte et al. 2020: 3 und 80; Wietschel et al. 2019: 7). Genannt werden besonders die unterschiedliche Bepreisung von Energie-

trägern und die finanzielle Doppelbelastung dezentraler Energiespeicher sowie die unflexible Nutzung von EE-Anlagen aufgrund der *Klassifizierung von Rest- und Abfallstoffen* (Kharboutli et al. 2018: 21ff.). Diese Herausforderungen wurden auch analytisch aus den Expert*innengesprächen herausgearbeitet (u.a. B: 6; G: 2; K:4 und 19; L: 7). Mögliche Spannungsverhältnisse werden in der Literatur aufgrund der *unterschiedlichen Bepreisung von Energieträgern* gesehen, die Umwelt- und Klimawirkungen nicht ganzheitlich betrachten und zu Wettbewerbsnachteilen erneuerbarer Energieträger sowie umwelt- und klimaverträglicher Technologien führen können (Wietschel et al. 2019: 7; Agora Energiewende 2017: 91; K: 4). Sektorenspezifische Rahmenbedingungen für Energieträger spiegeln zudem nicht ausreichend die CO₂-Intensität wider: Im Rahmen von Power-to-Heat Technologien konkurriert bspw. sektorenggekoppelte Wärme direkt mit fossilen Energieträgern, die mit konventionellen Technologien erzeugt werden (Kharboutli et al. 2018: 21f.). Neben sektorübergreifenden Regulierungen werden Anpassungspotenziale besonders dort gesehen, wo Instrumente, wie Steuern oder Entgelte, wirtschaftlich effektiver werden und zu einem klima- und umweltverträglicheren Energiesystem beitragen können (Wietschel et al. 2019: 7; K: 10). Als Treiber einer effizienteren Sektorenkopplung wird aktuell die *einheitliche CO₂-Bepreisung* angesehen: Neben der Umgestaltung der Energiepreise hin zu mehr Wettbewerbsfähigkeit von Strom, bspw. im Wärmemarkt, könnten auch CO₂-Einsparzielsetzungen für die jeweiligen Verbrauchssektoren angedacht werden (Schwan et al. 2016: 48f.; BWP 2017; K: 10). Die ESYS-Arbeitsgruppe „Strommarktdesign“ eruiert nach einem Marktdesign, das die Sektorenkopplung unterstützt und benennt dabei eine einheitliche und wirksame CO₂-Bepreisung als zentrales Element für die Erreichung der klimapolitischen Ziele der Bundesregierung (Akademienprojekt ESYS 2019: 2f.). Neben der CO₂-Bepreisung sollen vor allem Steuern, Abgaben und Umlagen reformiert werden: „Die Einnahmen einer wirksamen CO₂-Bepreisung können dazu dienen, andere Preisbestandteile wie die EEG-Umlage und die Stromsteuer zu ersetzen und gegenzufinanzieren“ (ebd.: 3). Neben der Entlastung für einkommensschwache Personen(gruppen), können die Mehreinnahmen auch zur Förderung umwelt- und klimaverträglicher Technologien genutzt werden (ebd.: 14).

In Bezug auf diese Anpassungspotenziale formulierte eine regionale Energieversorgung in Nordhessen die *Stromeinspeisung ins öffentliche Netz* als Herausforderung, da bislang Blockheizkraftwerke (BHKWs) von der geplanten CO₂-Bepreisung ausgenommen werden

sollen (K: 4). Aktuell müssen hohe Durchleitungsgebühren an die Netzbetreiber*innen entrichtet werden, weshalb sich Anlagenbetreiber*innen regenerativer Energien dafür entscheiden (könnten), den Strom nur selbst zu nutzen (D: 14). Zudem formulierte die Bauaufsicht des Landkreises Kassel die *fehlende Förderung für die Instandhaltung regenerativer Anlagen*, deren Kosten die von Öl- oder Gaskesseln meist übersteigen würden (J: 11). Als Anpassungspotenziale werden vor allem die *Förderung von Flexibilitätstechnologien* gegen Wärmeverluste sowie die Aufnahme von Energiespeicherlösungen in das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) benannt (B: 6f und 15; D: 9).

Die unflexible Nutzung von Erneuerbare-Energien-Anlagen (EE-Anlagen) wird als weitere Herausforderung betrachtet (Kharboutli et al. 2018: 23; u.a. B: 6; G: 2; H: 1). Im EEG wird die Anlagenunterteilung durch das Marktprämienmodell geregelt, das einen garantierten Netzzugang und eine Marktprämienvergütung ermöglicht (Kharboutli et al. 2018: 23). EE-Anlagen können zwar unabhängig vom EEG ohne zusätzliche Vergütung und garantierten Netzzugang betrieben werden, eine flexible Nutzung der Anlagen ist allerdings ausgeschlossen und verhindert die effiziente Verwertung von Biomasserest- und Abfallstoffen (ebd.). Biomassereststoffe, die dem Abfallrecht unterliegen, dürfen nicht in einer Anlage für *Nachwachsende Rohstoffe* (NawaRo) verwertet werden (G: 2). Für Abfallstoffe gibt es strengere Verordnungen, bspw. die Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (AwSV) (A: 12)⁹. Sowohl eine wissenschaftliche Einrichtung als auch eine Energieberatung in Nordhessen bezeichneten die *Klassifizierung von Rest- und Abfallstoffen* als zentrale Herausforderung, die die energetische Verwertung von Biomassepotenzialen erschweren würde (G: 2; A: 15f.). Die Unterteilung in Anlagen für NawaRo- und Abfallanlagen führe laut der Energieberatung im Untersuchungsraum auch dazu, dass Kopplungsinnovationen, wie Substratmischungen in Testmaschinen, nicht ausprobiert werden könnten (G: 2). Am Beispiel von Biogasanlagen nehme zudem der Wegfall der Marktprämienvergütung Einfluss auf die flexible Wärmeabgabe. Um als Anlagenbetreiber*in wei-

⁹ Je nach Bundesland existieren zudem unterschiedliche Abfallbegriffe. Manche Bundesländer bezeichnen aufgearbeitetes holziges Grüngut weiterhin als Abfallstoff, in anderen Bundesländern geht die Abfalleigenschaft aufgrund der Aufbereitung verloren (A: 10). Zudem werden Gärprodukte mit der Düngeverordnung auf die betriebliche Obergrenze für organische Düngemittel angerechnet. Demnach werden über die Düngeverordnung auch andere Reststoffe geregelt, wie Komposte und Gärreste (A: 15f.).

terhin ökonomisch effizient sein zu können, müsse laut des Maschinenrings KommunalSERVICE GmbH nach dem Auslaufen der EEG-Vergütung der Strom vorrangig zu Zeiten von Spitzenpreisen an der Strombörse vermarktet werden (B: 15). Als Anpassungspotenzial formulierte das Regierungspräsidium Kassel (Landwirtschaft) die *Überprüfung der rechtlichen Kategorisierungen von Reststoffen*, damit zukünftig auch Reststoffpotenziale verwendet werden könnten, die aktuell als Abfall deklariert würden (L: 2). Zudem sei die *Förderung der Investitions- und Betriebskosten* für eine längerfristige Planungs- und Investitionssicherheit notwendig. Im Rahmen eines längerfristigen Projektes könnten dann bspw. Abschreibungen von Neuanlagen sowie definierte Mengenabgaben an Wärme und Strom, mögliche Wärme-, Strom- oder auch Gasleitungen mit Kostenübernahmen und Vertraulichkeiten finanziert werden (B: 2 und 5f.; D: 14; E: 13). Als weiteres Potenzial sei die *Förderung der Aus- und Weiterbildung* sowie Beratung wichtig, z.B. im Rahmen innovativer Technologien im Bereich von Wärmenetzen (B: 16; E: 7). Für das Land Hessen existieren verschiedene Förderprogramme mit den Schwerpunktbereichen Energieeffizienz und erneuerbare Energien und Technologien¹⁰.

3.2 Sozial-ökologische Herausforderungen und Potenziale

Der steigende Strombedarf wird als eine Konsequenz der Sektorenkopplung beschrieben. Es stellt sich die Frage, wie dieser effizient - in Bezug auf Energie, Ressourcen und Flächen - erzeugt werden kann (Schwan et al. 2016: 19; 33 und 55). Für eine dezentrale Energiewende müssen allerdings noch vor den Effizienz-Gedanken suffiziente Lösungen, wie die Reduktion von Ressourcen und Umweltauswirkungen durch die Reduktion des Energiekonsums, zur Diskussion gestellt werden (ebd.: 33; Paech 2014: 147). Rebound- und Verlagerungseffekte müssen durch geeignete Maßnahmen reduziert werden (Bader et al. 2019: 11). Neben der Reduktion des Energieverbrauchs stellt die sozial-verträgliche Belastung der Verbrauchssektoren eine weitere Herausforderung dar, vor allem für einkommensschwache Personen(gruppen) (Schwan et al. 2016: 55). Als Anpassungspotenziale werden in der

¹⁰ Eine Zusammenstellung bestehender und neuer Fördermöglichkeiten können bei der LandesEnergieAgentur (LEA) eingesehen werden: <https://landesenergieagentur-hessen.de/angebote/foerdermittelberatung-13314>

wissenschaftlichen Literatur für die Sektorenkopplung mit Rest- und Abfallstoffen einerseits die Relevanz der stofflichen (Mehrfach)Nutzungen mit anschließender energetischer Nutzung (Kaskadennutzung) sowie andererseits regionale Stoffkreisläufe mit kurzen Transportwegen und geringen Wärmeverlusten sowie benutzerfreundliche Entsorgungs- und Verwertungsoptionen formuliert (ebd.; Rupp et al. 2020: 135; Kern et al. 2018: 140; Gärtner et al. 2013: 74).

Mehrfachnutzungen von Rest- und Abfallstoffen wie bspw. eine vorgeschaltete Vergärung von Bioabfällen und Nahrungsmittelresten mit anschließender stofflicher Verwertung der Gärreste stellen eine transformative Alternative dar (Kern et al. 2018: 140; A: 7). Derzeit findet in den untersuchten Kommunen ungefähr bei einem Drittel des Biogutes eine Mehrfachnutzung statt (A: 2). Im Rahmen der holzigen Biomasse herrscht kein wissenschaftlicher Konsens darüber, ob eine stoffliche Nutzung immer einer energetischen Verwertung vorzuziehen ist. Eine treibhausgaseinsparende stoffliche Nutzung wird gemeinhin als vorteilhafter gegenüber der direkten energetischen Verwertung eingestuft (Gärtner et al. 2013: 74).

Für *Rest- und Abfallstoffe* bestehen in der Regel *Nutzungskonkurrenzen*, bspw. aufgrund rechtlicher Vorgaben oder unterschiedlicher Entwicklungsperspektiven die dazu führen (können), dass bestehende Potenziale anderweitig verwertet werden (Lenz 2021: 40). Nach Einschätzung des Fachbereiches Landwirtschaft im Landkreis Kassel seien auf den meisten landwirtschaftlichen Nutzflächen keine nutzbaren Potenziale für energetische Zwecke vorhanden, da diese entweder in den landwirtschaftlichen Betrieb einfließen oder bereits über die landwirtschaftlichen Biogasanlagen verwertet würden (I: 1). Auswirkungen des Klimawandels, besonders die lange Trockenheit, könnten zudem landwirtschaftliche Potenziale reduzieren (ebd.: 5). Kalamitätenholz, d.h. Holz, das aufgrund von Schadereignissen anfällt, sei laut der Revierförsterei aufgrund der Trockenheit als kurzfristiges und schwankendes Potenzial mit teilweise großen Mengen hinzugekommen (F: 1f.). Hinsichtlich der Verfügbarkeiten von Biomassereststoffpotenzialen stellen das Gemeindeamt für Umwelt und Tiefbau sowie die wissenschaftliche Einrichtung *fehlende Entsorgungs- und Verwertungsoptionen* als eine Herausforderung für die Städte dar (A: 4; H: 1). In etwa die Hälfte der Nahrungs- und Gartenabfälle würden über die Restmülltonne oder private Gartenabfälle illegal z.B. am Waldrand entsorgt (A 3; F 2). *Viele kleine Sammelplätze*, auf denen entgeltfrei

z.B. holziges Grüngut abgegeben werden, könnten diese Verluste laut des wissenschaftlichen Mitarbeiters teilweise auffangen¹¹ (A: 4). Container seien auch eine komfortable Lösung, da sie meistens zentral in der Stadt aufgestellt werden könnten. Allerdings seien diese teurer, vor allem, weil das Grüngut öfter abgeholt werden müsse (A: 4). Für Nordhessen benennen die Interviewpartner*innen für die Erzeugung der Energieformen hinsichtlich der Aufbereitung und Verwertung vor allem *holzige Biomasse*. Die großen Mengenpotenziale an holzigem Grüngut, holzigem Landschaftspflegematerial sowie aus Altholz aus Bau-restmassen könne laut der regionalen Abfallentsorgung gut für die Strom- und Wärme-erzeugung eingesetzt werden (D: 3)¹².

Regionale Stoffkreisläufe schätzt der Maschinenring Kommunalservice GmbH als produktiv ein, da flexibel auf Bedarfe und Ressourcenverfügbarkeiten reagiert werden könne (B: 12). Neben der Versorgungssicherheit aufgrund der Verknüpfung zwischen dem ländlichen und städtischen Raum sowie der Unabhängigkeiten von importierten Energieträgern, könne sie auch einen Beitrag zur regionalen Wertschöpfung durch die Verwendung von Abfall- und Reststoffen für die direkte und indirekte Elektrifizierung ermöglichen (B: 11f.). Einige Biogasanlagen in Hessen verfügen bereits über Nahwärmekonzepte (L: 7). Die Vernetzung bestehender Biogasanlagen zur Nutzung überschüssiger Energie stelle eine weitere Möglichkeit dar. Strom könne ausgekoppelt und dabei entstehende Wärme in einem durch IT-Systeme flexibel betriebenen Netz genutzt werden (B: 2). Power-to-X-Technologien könnten dabei unterstützen, Stoffkreisläufe zu schließen (Ausfelder et al. 2019: 188).

In Bezug auf *Wärmeverluste* wird die netzgebundene Wärmeversorgung in der wissenschaftlichen Literatur im Vergleich zur netzgebundenen Stromversorgung als komplexer bezeichnet, da Wärme im besten Fall in unmittelbarer Nähe zu den Verbraucher*innen erzeugt werden sollte, um Transportwege und die damit verbunden Kosten und mögliche

¹¹ Beispiel aus dem Werra-Meißner-Kreis: Sammelplätze für holziges Grüngut werden von den Kommunen eingerichtet und betrieben. Die Entsorgung des Materials und ein Zuschuss für die Kommunen (z. B. für die Kosten von Mitarbeiter*innen für die Annahmetage werden über die Abfallgebühr finanziert. Der Abfallzweckverband finanziert die Genehmigung der Plätze und ist für die Materialverwertung zuständig. Zweimal im Jahr wird das Gut abgeholt und geschreddert. (Kosten für Restmüll und Biotonne sind im Vergleich viel teurer). Auf Sammelplätzen wird nur während des Winters holziges Grüngut gesammelt. Krautiges Grüngut wird über die Biotonne abgeholt (A: 5).

¹² Als Herausforderung wird besonders die Verbrennung von holzigem, nicht genormtem Material genannt, da kleinere Hackschnitzelöfen oft störanfälliger sind (A: 18; E: 3). Die Lagerung kann bei faserigem, kleinästigem Holz aufgrund des Kompostiereffekts problematisch sein (E: 4).

Wärmeverluste reduzieren zu können (Schubert 2016: 261; Pfür 2016: 48). Die netzgebundene Wärmeversorgung ist ökonomisch auf eine gleichbleibende Nachfrage angewiesen (Schubert 2016: 262). Eine regionale Energieversorgung sowie die Energieberatung raten den Ausbau von Nahwärmenetzen für Nordhessen nur dann an, wenn Wärmeabnehmer*innen sich über einen längeren Zeithorizont von 15-20 Jahren verpflichten würden, in dem sie in etwa gleich viel Kilowattstunden Wärme abnehmen könnten (E: 8; G: 1). Laut des Klimaschutzmanagers würden besonders kommunale Liegenschaften als verlässliche Wärmeabnehmer*innen angesehen (C: 1). Zu beachten gelte laut einer regionalen Energieversorgung das Verhältnis von gebrauchter zur transportierten Wärme: In einem Neubaugebiet mit einem Anschlusszwang würden zwar alle Abnehmer*innen angeschlossen, allerdings können die Gebäude so gut gedämmt sein, dass die Heizlast gering sei. Nationale Zielsetzungen der Wärmedämmung im Gebäudebereich würden zudem die Heizlast verringern. Familienhäuser stehen meist in einem gewissen Abstand zueinander, wodurch eine große Leitungslänge benötigt werde (E: 15). Aus diesem Grund wird die netzgebundene Wärmeversorgung oft als in Konkurrenz stehend zur Gebäudesanierung beschrieben (Schwan et al. 2016: Schubert 2016: 262). Resümierend wird sowohl in der Literatur als auch in den Interviews die netzgebundene Wärmeversorgung dann als effizient bezeichnet, wenn Wärme bereits vorhanden ist (Müllheizkraftwerk, Biogasanlagen, etc.), die Leitungslängen kurz sind und historische Gebäude, Fachwerkhäuser oder Industrie mit angeschlossen sind (*Ensemblelösungen*), die auch perspektivisch einen etwas höheren Energiebedarf haben als der Neubau (wenn bspw. eine Wäscherei angeschlossen ist, die ganzjährig Wärme benötigt) (Schubert 2016: 262; E: 11; D:7). Einzellösungen, wo bspw. nur in den kalten Monaten eine Holzverbrennungsanlage an das Wärmenetz angeschlossen werde, seien laut der regionalen Energieversorgung sinnvoll gegen Wärmeverluste in den wärmeren Monaten (E: 12). Gerade für flächige Landkreise, in denen die Entfernungen für Nahwärmenetzversorgungen zu weit seien, könnten Sonderlösungen eine sinnvolle Alternative darstellen (J: 7). Gegen Wärmeverluste könnten zudem *kommunale Wärmepläne* fungieren, die den kommunalen Gebäudesanierungsstand sowie die jeweiligen Wärmebedarfe darstellen (E: 7). Bei der Planung von Neubaugebieten könnten so einfacher Koppellösungen bspw. mit Fachwerkhäusern geplant werden. Das Instrument des Anschluss- und Benutzungszwanges würde es den Kommunen ermöglichen Wärmeabnehmer*innen für ei-

nen Zeitraum von 15-20 Jahren zu verpflichten (E: 7f.). Damit die Kosten für einkommensschwache Personen(gruppen) nicht verhältnismäßig ansteigen, sollten zudem Aspekte einer *gerechteren Kostenverteilung* im Rahmen der regulatorischen Rahmenbedingungen mitgedacht werden (siehe Kap. 3.1).

3.3 Ökonomisch-technische Herausforderungen und Potenziale

Um mittels Sektorenkopplung zu einem integrierten Energiesystem zu gelangen, muss die über Jahrzehnte gewachsene, langlebige und kapitalintensive Energieinfrastruktur (in Form von Anlagen, Leitungsnetzen oder Speichern) umgebaut werden (BMW i 2018: 12; Ausfelder et al. 2017: 17). Eine Umstellung auf bzw. Anpassung an neue Versorgungsstrukturen benötigt lange Zeiträume. Die Geschwindigkeit der Energiewende kann nach Auffassung des BMW i verbessert werden, wenn dafür „innovative, an den Zielen der Energiewende orientierte Nutzungskonzepte für vorhandene Infrastrukturen und ihre kluge Vernetzung mit neuen Anlagen“ (2018: 12) entwickelt werden. Als ökonomisch-technische Herausforderungen werden sowohl in der wissenschaftlichen Literatur als auch im Rahmen der Interviews *hohe Investitionskosten und lange Amortisationszeiten* mit verbunden Unsicherheiten genannt, denen einerseits ein langfristiger Regulierungsrahmen mit gleichzeitig kurzfristigen technologischen Entwicklungen gegenüberstehen (Schwan et al. 2016: 48; Wietschel et al. 2019: 7). Die Investitionsrisiken werden ohne regulative Rahmenbedingungen und Planungssicherheiten als zu hoch für Energieerzeuger*innen dargestellt (Hölscher et al. 2020: 64). Die *fehlende Verbreitung innovativer Sektorenkopplungstechnologien* wird als weitere Herausforderung benannt, da konventionelle Alternativen oftmals preiswerter und zuverlässiger sind (Kharboutli et al. 2018: 23). Teure und große Infrastrukturprojekte, die zwar als innovativ eingestuft werden, können aufgrund der starken infrastrukturellen Veränderungen häufig noch nicht getestet werden. Genannt werden im Verkehrssektor bspw. Oberleitungen auf Autobahnen zur Elektrifizierung des Lastverkehrs (Schwan et al. 2016: 24).

Für Nordhessen werde für die Umsetzung dezentraler Sektorenkopplungslösungen *wirtschaftlich effiziente Konzepte mit klaren Zeitplanungen* als relevant erachtet (u.a. B: 2 und 6; D: 9 und 14; I: 7; K: 10). Laut des Maschinenrings KommunalService GmbH seien Anlagen

gemeinhin *flexibler* zu gestalten, um auf kommunale Bedarfe und schwankende Biomassereststoffpotenziale reagieren zu können (B: 2 und 6). Besonders *Flexibilitätstechnologien*, die sich an die jeweiligen kommunalen Rahmenbedingungen anpassen, sollten gefördert werden (D: 9; B: 2). Am Beispiel von Power-to-Heat wird im Rahmen des Betriebs der Vergärungsanlage in Lohfelden bspw. Biogas in das Mikronetz der Gemeinde Lohfelden eingespeist. Das Gas wird zu verschiedenen BHKWs der Gemeinde zur Wärme- und Stromerzeugung geleitet und versorgt somit kommunale Liegenschaften wie das Rathaus und eine Schule (D: 12). Flexibilitätsoptionen werden auch in der wissenschaftlichen Literatur als notwendiger Beitrag für Energieeffizienz und sektorenübergreifende Verzahnungen gesehen (Zipp 2016: 237). Im Rahmen einer Stadt-Umland-Kooperation könnten laut des Maschinenrings Kommunalservice GmbH bestehende Biogasanlagen zur Einsparung von Leitungen mit einer Gas- oder mit einer Warmwasserleitung verbunden werden (B: 2). Strom könne ausgekoppelt und dabei entstehende Wärme im Rahmen eines durch IT-Systeme flexibel betriebenen Netzes genutzt werden (ebd.: 1). Größere Energiemengen könnten *digital* und flexibel gespeichert und bei Bedarf eingespeist werden (L: 7). In Nordhessen werden entsprechende Vorhaben sowohl von Biogasanlagenbetreiber*innen als auch vom Regierungspräsidium eruiert.

4. Zusammenfassung der Herausforderungen und Potenziale der Sektorenkopplung

Sektorenkopplung ist ein normatives Konzept, das auf Effizienzsynergien mittels technologischer Innovationen setzt. Und sich damit auch von Suffizienzstrategien abgrenzt. Als politisch dominantes Zielverständnis von Sektorenkopplungen herrscht die direkte bzw. indirekte Elektrifizierung der Sektoren Wärme und Verkehr vor. Zentral im vorliegenden Arbeitspapier sind die Erarbeitung einer Definition für Sektorenkopplung, die Rest- und Abfallstoffe umfasst, sowie die Darstellung empirischer Einblicke in Herausforderungen und Potenziale dezentraler Sektorenkopplungslösungen am Beispiel von Nordhessen. In Anleh-

nung an das Sektorenverständnis von Wietschel et al. (2019) sowie auf Grundlage der Expert*innengespräche werden vier dezentrale Kopplungsformen definiert: Die Sektorenkopplung innerhalb der **Aufbereitung und Verwertung der Energieträger**, der **Endenergieformen** und des **Energiekonsums** und quer dazu die intersektorale Kopplung der **Technologien und Infrastrukturen**. Dezentrale Sektorenkopplung mit Abfall- und Reststoffen verstehen wir als stoffliche, materielle, informative und energetische Kopplung, die dynamisch ist und sich spezifisch an den räumlichen Kontext anzupassen hat. Zudem betrachten wir die dezentrale Energiewende als relationales Phänomen, da Innovationen von multidimensionalen und kontextspezifischen Rahmenbedingungen reguliert werden. Der mehrdimensionale Ansatz ermöglicht auch die Identifikation suffizienter Potenziale und Herausforderungen einer dezentralen Energiewende, da sektorenübergreifend sowohl regulative und sozial-ökologische Rahmenbedingungen als auch ökonomische Anreize betrachtet werden. Abbildung 5 fasst die zentralen Ergebnisse zu den Herausforderungen und Potenzialen der Sektorenkopplungen unter Berücksichtigung der drei Dimensionen *politisch-regulatorisch*, *sozial-ökologisch* und *ökonomisch-technisch* zusammen (siehe Kap.3).

Die empirischen Ergebnisse zeigen, dass sowohl die **kommunale als auch die nationale Politik** im Rahmen dezentraler Sektorenkopplungslösungen aufgrund finanzieller Anreize oder Subventionen und regulatorischer Rahmenbedingungen als eine zentrale Ebene im Untersuchungsraum bezeichnet wird. Politisch-regulative Rahmenbedingungen entscheiden zudem maßgeblich über die Prozesse, wie Infrastrukturen geplant und umgesetzt werden können. **Infrastrukturen und Technologien** gehen häufig mit hohen Investitionskosten einher und werden über einen längeren Zeithorizont mit langfristigem Regulierungsrahmen implementiert, d.h. es kann nur langsam auf technische Innovationen und Lebensstilveränderungen reagiert werden. Bei bestehenden Anlagen fallen zudem Instandhaltungskosten an, die aktuell nicht gefördert werden. Als Anpassungspotenziale können neben der Finanzierung der Investitions- und Betriebskosten das Experimentieren neuer Infrastrukturen und kommunaler Projekte als ein wichtiger Lernprozess gelten, der auch verschiedene Akteure miteinander vertraut macht und Interessen und Identitäten verändern kann (Bulkley et al. 2014: 1482f.). Wichtig hierfür sind neben der Aus- und Weiterbildung sowie Beratung vor allem umwelt- und klimaverträgliche Flexibilitätstechnologien und flexible An-

lagen, die bspw. auf schwankende Biomassereststoffpotenziale reagieren können. Allerdings können aktuell aufgrund der Unterteilung in Anlagen für NawaRo- und Abfallanlagen nicht flexibel Biomassereststoffpotenziale energetisch verwertet werden.

Abbildung 6: Ergebnisse dezentraler Kopplungsformen (Eigene Darstellung)

Technologien und Infrastrukturen		
<p>Herausforderungen: hohe Investitionskosten, lange Amortisationszeiten, langfristiger Regulierungsrahmen mit kurzfristigen technologischen Entwicklungen, fehlende Verbreitung innovativer Technologien, fehlende Förderung für die Instandhaltung regenerativer Anlagen, finanzielle Doppelbelastung dezentraler Energiespeicher</p> <p>Potenziale: Förderung umwelt- und klimaverträglicher Flexibilitätstechnologien und flexiblen Anlagen, Aufnahme von Energiespeicherlösungen in das EEG, Finanzierung der Investitions- und Betriebskosten, Förderung der Aus- und Weiterbildung sowie Beratung</p>		
Aufbereitung und Verwertung der Energieträger	Endenergieformen	Energiekonsum
<p><i>Herausforderungen:</i> Unterteilung in Anlagen für NawaRo- und Abfallanlagen, Nutzungskonkurrenzen bei Reststoffpotenzialen, wenige Entsorgungsoptionen</p> <p><i>Potenziale:</i> flexible Nutzung von EE-Anlagen, stoffliche (Mehrfach)Nutzungen mit energetischer Nutzung, regionale Stoffkreisläufe mit kurzen Transportwegen, benutzerfreundliche Entsorgungs- und Verwertungsoptionen, Überprüfung der rechtlichen Reststoffkategorisierungen</p>	<p><i>Herausforderungen:</i> unterschiedliche Bepreisung von Energieträger, fehlende Regulierung der Steuern, Abgaben und Umlagen (besonders der Sektoren Verkehr, Wärme und Industrie)</p> <p><i>Potenziale:</i> flexible Nutzung von EE-Anlagen, einheitliche CO₂-Bepreisung, direkte und indirekte Elektrifizierung</p>	<p><i>Herausforderungen:</i> Reduktion von Rebound- und Verlagerungseffekten, geringe Wärmeverluste, verlässliche Wärmeabnehmer*innen über einen längeren Zeithorizont</p> <p><i>Potenziale:</i> Reduktion des Energieverbrauchs, sozialverträgliche Belastung der Verbrauchssektoren, Nahwärmeinselnetze, kommunale Wärmepläne, Anschluss- und Benutzungszwang</p>

Bezüglich der **Aufbereitung und Verwertung** der Energieträger wurde in den Interviews deshalb angeregt, die rechtliche Kategorisierung zwischen NawaRo und Abfall auf nationaler Ebene überprüfen und gegebenenfalls modifizieren zu lassen. Kopplungsinnovationen, wie weitere Substratmischungen, sollten zudem in Testmaschinen erlaubt werden. Als sozial-ökologische Anpassungspotenziale werden sowohl in der Literatur als auch den Inter-

views Kaskadennutzung, regionale Stoffkreisläufe mit kurzen Transportwegen sowie benutzerfreundliche Entsorgungs- und Verwertungsoptionen betrachtet. Ob allerdings eine stoffliche Nutzung immer einer energetischen Verwertung vorzuziehen ist, bleibt wissenschaftlich unklar. Vor allem in der wissenschaftlichen Literatur, aber auch in den Interviews wird im Rahmen der **Endenergieformen** die fehlende Regulierung der Steuern, Abgaben und Umlagen, besonders der Sektoren Verkehr, Wärme und Industrie, benannt. Und das, obwohl Strom zukünftig besonders in den genannten Sektoren genutzt werden soll. Das tangiert die sozial-ökologische Dimension, da der steigende Strombedarf in der Wissenschaft als eine Konsequenz der Sektorenkopplung beschrieben wird. Zu klären gilt, wie der Strom effizient in Bezug auf Energie, Ressourcen und Flächen erzeugt werden kann. Hierfür sind beim **Energiekonsum** politisch-regulative und gesellschaftliche Rahmenbedingungen notwendig. Diese werden teilweise in der wissenschaftlichen Literatur benannt (u.a. Schwan et al. 2016: 31ff.; Olfert et al. 2020: 57), spielen allerdings im Rahmen der Expert*innengespräche eine untergeordnete Rolle. Neben suffizienten Lebensstilveränderungen, die Rebound- und Verlagerungseffekte beachten, müssen auch Aspekte einer gerechteren Kostenverteilung für einkommensschwache Personen(gruppen) mitbedacht werden. Kopplungsformen zwischen Eigentümer*innen (bspw. kommunale Liegenschaften) und Gebäudetypen (Fachwerk- und Bauernhäuser, Neubaugebiete) ermöglichen gerade im Wärmebereich neue Potenziale. Für den Untersuchungsraum mit größeren Entfernungen, mit geringer Siedlungsdichte und einer relativ hohen Wärmedämmung werden zudem Nahwärmeinselnetze als eine Möglichkeit betrachtet. Kommunale Liegenschaften werden im Untersuchungsraum als verlässliche Wärmeabnehmer*innen angesehen.

Das Beispiel in Hofgeismar zeigt zudem, dass die **Innovations- und Motivationsbereitschaft** eine entscheidende Rolle dabei spielt, ob und wie Sektorenkopplungslösungen umgesetzt werden. Dezentrale Sektorenkopplungslösungen hängen besonders von der Motivationsbereitschaft und dem Erfahrungswissen kommunaler Akteure sowie deren Entwicklungsperspektiven ab. Dezentrale Innovationen können zwar wirtschaftlich ineffizient sein, aber dennoch durchgeführt werden, wenn zentrale Akteure die Motivationsbereitschaft haben und transformative Veränderungen voranbringen möchten. Wie Büscher et al. resümieren, beschäftigen sich bisher nur wenige Studien mit dezentralen Kopplungsinnovationen (2020: 22). Und das, obwohl sich Nischeninnovationen besonders auf lokaler Ebene

befinden (Bulkeley et al. 2014: 1474). Diese Lücke gilt es zu schließen und das vorliegende Arbeitspapier stellt einen Beitrag dazu dar.

Bedarfe an Grundlagenwissen für die Sektorenkopplungsforschung sehen wir aus der Perspektive einer sozial-ökologischen und multiskalaren Transformation. Unser nächstes Working Paper wird sich mit Potenzialen multiskalarer Transformationsbedingungen für dezentrale Sektorenkopplungslösungen auseinandersetzen. Zu fragen gilt es dabei auch, wie dezentrale Sektorenkopplungslösungen suffizienter umgesetzt werden können. Denn eine dezentrale Energiewende basierend auf Sektorenkopplung ist ohne eine Suffizienzpolitik, die vor allem strukturelle und gesellschaftliche Rahmenbedingungen auf unterschiedlichen geographischen Maßstabsebenen adressiert, nicht zu erreichen.

5. Literaturverzeichnis

- acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften; Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina; Union der deutschen Akademien der Wissenschaften (Hg.) (2017): »Sektorkopplung« - Optionen für die nächste Phase der Energiewende. Stellungnahme. Berlin.
- Agora Energiewende (2020): Die Energiewende im Stromsektor: Stand der Dinge 2019. Rückblick auf die wesentlichen Entwicklungen sowie Ausblick auf 2020. URL: https://static.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2019/Jahresauswertung_2019/171_A-EW_Jahresauswertung_2019_WEB.pdf (22.01.2021).
- Akademienprojekt ESYS (2019): Über eine CO₂-Bepreisung zur Sektorenkopplung: Ein neues Marktdesign für die Energiewende. Impuls des Akademienprojekts „Energiesysteme der Zukunft“. URL: <https://energiesysteme-zukunft.de/impuls-marktdesign> (22.01.2021).
- Amanpour, Saman; Huck, Daniel; Kuprat, Mark; Schwarz, Harald (2018): Integrated energy in Germany—A critical look at the development and state of integrated energies in Germany. In: Front. Energy 12 (4). S. 493–500.
- Ausfelder, Florian; Fishedick, Manfred; Münch, Wolfram; Sauer, Jörg; Themann, Michael; Wagner, Hermann-Josef; Drake, Frank-Detlef (2017): »Sektorkopplung« - Untersuchungen und Überlegungen zur Entwicklung eines integrierten Energiesystems. Analyse. Hg. v. Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften und Union der deutschen Akademien der Wissenschaften. Berlin.
- Ausfelder, Florian; Dura, Hanna Ewa (Hg.) (2019): Optionen für ein nachhaltiges Energiesystem mit Power-to-X-Technologien. Nachhaltigkeitseffekte - Potenziale - Entwicklungsmöglichkeiten. 1. Auflage. Frankfurt am Main: DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V (Roadmap des Kopernikus-Projektes "Power-to-X", 2).
- Baasch, Stefanie (2016): A local energy transition success story. In: J. Hoff und Q. Gausset (Hg.): Community Governance and Citizen-Driven Initiatives in Climate Change Mitigation. Routledge. S. 130-149.
- Bader, Christoph; Bieri, Sabine; Schmidt, Stephan (2019): Erkenntnisse aus der Transformationsforschung für die Umweltpolitik nutzbar machen. Hintergrundpapier. Hg. v. Universität Bern und Centre for Development and Environment.
- Bauriedl, Sybille (2016): Formen lokaler Governance für eine dezentrale Energiewende. In: Geographische Zeitschrift 104 (2). S. 72-91.
- BMU – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2016): Klimaschutzplan 2050. Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung. URL: https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan_2050_bf.pdf (22.01.2021).
- BMWi - Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2016a): Grünbuch Energieeffizienz. Diskussionspapier des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. URL:

- https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/gruenbuch-energieeffizienz-august-2016.pdf?__blob=publicationFile&v=15 (22.01.2021).
- BMWi - Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2016b): Grünbuch Energieeffizienz. Auswertungsbericht zur öffentlichen Konsultation. URL: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/gruenbuch-energieeffizienz.pdf?__blob=publicationFile&v=26 (22.01.2021).
- BMWi - Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2017): Strom 2030. Langfristige Trends - Aufgaben für die kommenden Jahre. URL: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/strom-2030-ergebnispapier.pdf?__blob=publicationFile&v=34 (22.01.2021).
- BMWi - Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2018): Innovationen für die Energiewende 7. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung. Berlin. URL: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/7-energieforschungsprogramm-der-bundesregierung.pdf?__blob=publicationFile&v=11 (22.01.2021).
- Bulkeley, Harriet; Castán Broto, Vanesa; Maassen, Anne (2014): Low-carbon Transitions and the Reconfiguration of Urban Infrastructure. In: Urban Studies 51 (7). S. 1471–1486.
- Büscher, Christian; Scheer, Dirk; Nabitz, Lisa (2020): Future converging infrastructures. In: TATuP 29 (2). S. 17–23.
- BWP - Bundesverband Wärmepumpe e. V. (2017): Positionspapier: Wärmewende im Zeichen der Sektorkopplung. URL: https://www.waermepumpe.de/fileadmin/user_upload/BWP_Positionspapier-Sektorkoppelung_2018-04.pdf (22.01.2021).
- DBFZ – Deutsches Biomasseforschungszentrum (2020): DBFZ Jahrestagung 2020. Bioenergie zwischen Klimapaket und Bioökonomiestrategie. Tagungsreader.
- Gärtner, Sven; Hienz, Gunnar; Keller, Heiko; Müller-Lindenlauf, Maria (2013): Gesamtökologische Bewertung der Kaskadennutzung von Holz – Umweltauswirkungen stofflicher und energetischer Holznutzungssysteme im Vergleich. IFEU Heidelberg.
- Görg, Christoph (2001): „Gesellschaftliche Naturverhältnisse und die Transformation des globalen Kapitalismus“. URL: http://www.rote-ruhr-uni.com/cms/IMG/pdf/goerg_naturverhaeltnisse.pdf (22.01.2021).
- Hirschnitz-Garbers, Martin; Hinzmann, Mandy; Langsdorf, Susanne; Olfert, Alfred; Schiller, Georg; Brunnow, Benjamin; Hölscher, Katharina; Julia M. Wittmayer, Walther, Jörg. (2020): Transformation hin zu nachhaltigen, gekoppelten Infrastrukturen - Synthese der Ergebnisse. Teilbericht des Vorhabens: "Transformation hin zu nachhaltigen, gekoppelten Infrastrukturen", UBA Texte, 102/2020.
- HMWEV - Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Wohnen (2020): Energiewende in Hessen. Monitoringbericht 2020. URL: https://wirtschaft.hessen.de/sites/default/files/media/hmwvl/energiemonitoringbericht_2020_web.pdf (22.01.2021).
- Kern, Michael, Werner Sprick, Thomas Turk, Thomas Raussen, Axel Hüttner, Auke Lootsma-Hallerberg, Caroline Werner (2018): Schlussbericht - Hemmnisanalyse für den dyna-

- miserten Ausbau der Vergärungskommunalen Bioguts in Deutschland (Bio-DYN). Witzhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH. URL: http://www.witzenhausen-institut.de/images/downloads_aktuelles/bio_dyn_schlussbericht_witzenhausen_institut.pdf (22.01.2021).
- Kharboutli, Samir; Flemming, Sebastian; Brettschneider, Peter (2018): Tiefenbohrung "Sektorenkopplung". Wissenschaftliche Begleitforschung_ENERGIEWENDEBAUEN. RWTH Aachen. URL: https://projektinfos.energie-wende-bauen.de/fileadmin/user_upload/Publikationen/Studien- und Analysen/Tiefenbohrung/Tiefenbohrung_Sektorenkopplung.pdf (15.12.2020).
- Lenz, Christine (2020): Wie aus „Abfall“ Energie gewonnen werden kann. Im Forschungsprojekt KlimainnoGovernance geht es um regionale energetische Biomassenutzung aus Reststoffen. In: Kreisausschuss des Landkreises Kassel (Hg.): Jahrbuch 2021. S. 38-40.
- Libbe, Jens (2017): „Gekoppelte Infrastrukturen sind nicht nur eine technische Herausforderung“. In: Difu-Berichte (2). S. 4–5. URL: <https://repository.difu.de/jspui/bitstream/difu/238340/1/DB2571.pdf> (22.01.2021).
- Mayring, Philipp (2010): Qualitative Inhaltsanalyse. Grundlagen und Techniken. 11. aktualisierte und überarbeitete Auflage. Beltz: Basel und Weinheim.
- Olfert, Alfred; Brunnnow, Benjamin; Schiller, Georg; Walther, Jörg; Hirschnitz-Garbers, Martin; Langsdorf, Susanne; Hölscher, Katharina; Wittmayer, Julia M. (2020): Nachhaltigkeitspotenziale von innovativen, gekoppelten Infrastrukturen, UBA-Texte, 99/2020.
- Paech, Nico (2013): Eine zeitökonomische Theorie der Suffizienz. In: Umweltpsychologie, 17. Jg., Heft 2, 2013. S. 145-155.
- Rupp, Johannes; Böhmer, Jörg; Heinbach, Katharina; Bluhm, Hannes; Becker, Jan; Dunkelberg, Elisa; Hirschl, Bernd; Wagener, Frank; Heck, Peter (2020): Potenzialfelder einer ländlichen Bioökonomie. Analyse und Bewertung von Wertschöpfungsketten einer nachhaltigen Koppel- und Kaskadennutzung von nachwachsenden Rohstoffen. Schriftenreihe des IÖW 217/20.
- Schneidewind, Uwe (2013): „Transformative Literacy. Rahmen für den wissensbasierten Umgang mit der "Großen Transformation"“. In: *Gaia* 22 (2). S. 82–86.
- Stadt Hofgeismar (2020): Einwohnerzahlen. URL: <https://www.hofgeismar.de/kurz-buen-dig/zahlen-und-fakten/einwohnerzahlen/> (14.12.2020).
- Schubert, Susanne (2016): Ausbau von Wärmenetzen vs. energetische Sanierung? – Umgang mit konkurrierenden Strategien zur Umsetzung der „Wärmewende“ auf kommunaler Ebene. In: Raumforschung und Raumordnung 74 (3). S. 259–271.
- Hauser, Eva; Wern, Bernhard (2016): The role of bioenergy in the German “Energiewende”—whose demands can be satisfied by bioenergy? In: *Energy, Sustainability and Society* 6 (35). S. 1-9.
- Steubing, Michael; Dotzauer, Martin; Zakaluk, T, Wern, Bernhard; Noll, Florian; Thraen, Daniela (2020): Bioenergy plants’ potential for contributing to heat generation in Germany. In: *Energy, Sustainability and Society* 10 (14). S. 1-23.

- Schwan, Gesine; Treichel, Katja; Höh, Anne (2016): Sektorkopplung - von der Stromwende zur Energiewende. Bericht ETR/01-2016 zum Trialog vom 11. Juli 2016. URL: https://www.governance-platform.org/wp-content/uploads/2017/03/HVGP_Trialog-Bericht-Sektorkopplung.pdf (22.01.2021).
- Tittor, Anne (2020): Globale Biomasseproduktion. Unschöne Nebenwirkungen. In: Bioökonomie – Weltformel oder Brandbeschleuniger? politische ökologie 03/2020, Bandnr. 162. S. 71-76.
- Wietschel, Martin; Plötz, Patrick; Pfluger, Benjamin; Klobasa, Marian; Eßer, Anke; Haendel, Michael; Müller-Kirchenbauer, Joachim; Kochems, Johannes; Hermann, Lisa; Grosse, Benjamin; Nacken, Lukas; Küster, Michael; Pacem, Johannes; Naumann, David; Kost, Christoph; Kohrs, Robert; Fahl, Ulrich; Schäfer-Stradowsky, Simon; Timmermann, Daniel; Albert, Denise (2018): Sektorkopplung – Definition, Chancen und Herausforderungen Forschungsbericht. Fraunhofer ISI: Karlsruhe, Working Paper Sustainability and Innovation No. S 01/2018
- Wietschel, Martin; Plötz, Patrick; Klobasa, Marian; Müller-Kirchenbauer, Joachim; Kochems, Johannes; Hermann, Lisa et al. (2019): Sektorkopplung – Was ist darunter zu verstehen? In: Zeitschrift für Energiewirtschaft 43 (1). S. 1–10.
- Witte, Julika; Stephanos, Cyril (2020): CO2 bepreisen, Energieträgerpreise reformieren. Wege zu einem sektorenübergreifenden Marktdesign. Halle (Saale), Mainz, München: Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e.V. - Nationale Akademie der Wissenschaften; Union der deutschen Akademien der Wissenschaften e. V; acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e. V (Stellungnahme / Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina).
- Zipp, Alexander (2016): „Markt- und Systemintegration von erneuerbaren Energien im Rahmen der Systemtransformation – Ein Beitrag zur definitorischen Abgrenzung“. In: Zeitschrift für Energiewirtschaft 40 (4). S. 233–243.